

安徽菜子湖浮游植物群落结构的周年变化(2010年)*

刘雪花,赵秀侠**,高攀,韩飞园,周非,周忠泽***,徐慧琴
(安徽大学资源与环境工程学院,安徽省生态工程与生物技术重点实验室,合肥 230039)

摘要: 2010年对菜子湖浮游植物群落结构进行了调查和分析,结果显示:(1)共鉴定浮游植物8门110属285种,不同月份浮游植物的种类组成存在极显著差异,3月份种类数最多,173种,1月份最少,105种.优势度分析显示:蓝藻存在全年高峰;硅藻存在1、5、9、11月的高峰;黄藻存在1、3、5月的高峰;绿藻存在11月的高峰,隐藻存在5月份的高峰;金藻存在1月份的高峰.不同月份浮游植物的细胞密度亦存在极显著差异,7月份最高,为 $(66.13 \pm 8.58) \times 10^5$ cells/L,1月份最低,为 $(12.78 \pm 0.61) \times 10^5$ cells/L,夏、秋季较高,冬、春季较低;不同月份浮游植物的生物量差异极显著,9月份最高,为 2.80 ± 0.17 mg/L,5月份最低,为 0.72 ± 0.03 mg/L.(2) Margalef 丰度指数为1.51~3、Shannon-Weaver 多样性指数为1.41~3.01、Pielou 均匀度指数为0.39~0.66,各指数表现为冬、春季节大于夏、秋季节,3月份最高,7月份最低.(3)聚类分析的结果显示,月份不同影响因素不同,菜子湖水域浮游植物按群落结构特征的分组不同.(4)2007年相比,2010年浮游植物物种数有明显下降,由340种下降到285种,细胞密度明显上升,由 $(5.91 \pm 0.90) \times 10^5$ cells/L上升到 $(33.81 \pm 10.10) \times 10^5$ cells/L,群落结构变化较大,贫营养型和固着型藻类都有所减少,富营养型藻类、丝状藻类和浮游性藻类增多.
关键词: 浮游植物;生物量;聚类分析;菜子湖;群落结构

Annual dynamics of phytoplankton abundance and community structure (2010) in Lake Caizi, Anhui Province

LIU Xuehua, ZHAO Xiuxia, GAO Pan, HAN Feiyuan, ZHOU Fei, ZHOU Zhongze & XU Huiqin
(Anhui Key Laboratory of Eco-engineering and Bio-technique, School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230039, P. R. China)

Abstract: The annual dynamics of phytoplankton community structure in Lake Caizi has been investigated in 2010. The results indicated that: (1) A total of 285 phytoplankton species from 110 genera of 8 phylum were identified. Phytoplankton species composition in different months showed significant difference. The maximal number of phytoplankton species (173) occurred in March while the minimum (105) in January. The dominant class of phytoplankton changed seasonally. Cyanophyta peaked all the year round; diatoms had an apparent dominance in January, May, September and November; Xanthophyta also played an important role in January, March and May; Chlorophyta dominated in November, Cryptophyta dominated in May while Chrysophyta dominated in January. The cell density and biomass of phytoplankton were higher in summer and autumn than that in winter and spring. The cell density of phytoplankton between different months had significant difference. The maximal density, with the value $(66.13 \pm 8.58) \times 10^5$ cells/L occurred in July while the minimal value of $(12.78 \pm 0.61) \times 10^5$ cells/L appeared in January. Whereas, the maximal biomass of phytoplankton (2.80 ± 0.17 mg/L) occurred in September and the minimal (0.72 ± 0.03 mg/L) appeared in May, and the biomass in different months was also significant different. (2) Temporal variations of three indices (including Margalef index, Shannon-Wiener index and Pielou evenness index) were obvious. All the indices were higher in winter and spring than those in summer and autumn. The maximal value occurred in March while the minimal one appeared in July. (3) The phytoplankton community structure was influenced by different factors in different months. As a result, the groups of sampling station changed

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2009ZX07103-002)、国家自然科学基金项目(41072251)和现代古生物学和地层学国家重点实验室项目(113106)联合资助. 2011-11-07 收稿;2012-02-09 收修改稿. 刘雪花,女,1985年生,硕士研究生;E-mail:girlxingyu@163.com.
** 并列第一作者;赵秀侠,女,1981年生,博士研究生;E-mail:xiuxia99@126.com.
*** 通信作者;E-mail:zhzz@ahu.edu.cn.

seasonally according to cluster analysis. (4) The obvious variation of phytoplankton community structure was present in 2010 compared with that in 2007. The number of species decreased from 340 in 2007 to 285 in 2010, however, the cell density increased obviously from $(5.91 \pm 0.90) \times 10^5$ cells/L in 2007 to $(33.81 \pm 10.10) \times 10^5$ cells/L in 2010. At the same time, both the numbers of oligotrophic algae and periphytic algae decreased to the same extent and eutrophic, filamentous and planktonic algae increased.

Keywords: Phytoplankton; biomass; cluster analysis; Lake Caizi; community structure

通江湖泊在湿地生态系统中具有重要作用^[1],它周期性的水文变化使得通江湖泊存在较多的湿地生境,不仅为鱼类提供了洄游和繁殖场所,而且也为鸟类提供了越冬地和栖息地,对维持生态平衡和保护生物多样性具有重要意义^[2-3]. 菜子湖属浅水型通江湖泊,它位于长江北岸,大别山东南侧,是安徽沿江湿地的重要组成部分. 菜子湖(30°43′~30°58′N,117°01′~117°09′E)原是长江流域中受人为干扰相对较小的湖泊之一. 每年7—9月为丰水期,面积达24230 hm²,水位最高达7 m,每年12月至次年3月为枯水期,面积为14520 hm²,水位明显下降,最低的地方水深只有80 cm. 菜子湖出水经长河通过枞阳闸入江,丰水期由水利部门通过通江闸控制,为季节性通江湖泊^①.

近年来由于养殖业的大力发展,草食性鱼类和螃蟹的大量养殖使得水草数量急剧下降,几近绝迹. 1990s菜子湖生态系统较为完整,植被覆盖度达90%以上,2004年以后由于养殖业的发展使得菜子湖植被有所减少,2005年植被覆盖度仅80%,2007年不足50%,2009年整个湖区植被盖度不足3%^[4]. 有研究结果表明不科学的养殖技术导致水草锐减,引起了湖泊由草型向藻型转化^[5],成为水体富营养化的原因之一^[6]. 在湖泊由草型湖泊向藻型湖泊转化过程中,浮游植物对水生植被的响应关系成为湖泊生态学研究的重要内容,主要体现在浮游植物的丰度、生物量及群落结构的变化. Sayer等在研究英国和荷兰的营养化程度不同的39个浅水湖泊时发现,湖泊富营养化过程实际上是大型植物物种多样性减少,而藻类丰度增加的过程^[7]. 许多研究报道也证明了浅水湖泊由大型植物占优势到浮游植物占优势的过渡^[8-9]. Hilton等指出,水体富营养化过程中,会由以大型植物占优势向以底栖藻类、丝状藻类和浮游性藻类占优势过渡^[10]. 饶钦止等在研究武汉东湖1956—1975年浮游植物的演变时发现,由于过量投放草鱼使得全湖均有的水草几乎绝迹,浮游植物中硅藻等着生性和草丛性种类减少,鼓藻等贫营养型藻类减少,蓝藻门的蓝纤维藻和平裂藻出现率大大上升^[11].

水草和浮游植物在水生生态系统中处于同一营养级,属于竞争关系,两者在一定程度上可以相互抑制^[12-13],表现在生长上,即沉水植物的生物量和浮游植物的生物量呈负相关^[14]. 章宗涉^[14]对11个湖泊的分析结果表明,沉水植物分布广泛(超过湖泊总面积的50%)、生物量较高(每平方米几千克鲜重)的湖泊中,透明度高,浮游植物生物量就较低(叶绿素值低于10 mg/m³). Asaeda等对南非Swartvlei湖的研究表明,浮游植物的大量生长会对大型植物造成遮阳效果,影响大型植物对光的吸收,而大型植物大量生长时也会对浮游植物产生遮阳作用,影响其光合作用^[12]. Mulderija, Körner和Mulderij等的实验结果证明,有些大型植物(如轮藻、狐尾藻、水剑叶等)可以通过植化相克作用来抑制浮游植物的生长^[13,15-16]. 因此,可以推断通江湖泊水生植被是影响浮游植物群落结构及其物种组成的重要因素之一. 本研究于2010年春、夏、秋、冬季对菜子湖进行了调查和分析,结合2007年对菜子湖浮游植物及以往对水生植被的研究结果,以期探讨在湖泊植被显著下降的背景下,水生生态系统的重要组成成分浮游植物的响应,即浮游植物的种类组成和群落结构发生的相应变化.

1 研究方法

1.1 采样点的设置

根据《淡水浮游生物研究方法》^[17]的要求并结合菜子湖的特点,设置10个采样断面,每个采样断面设3个采样点(图1).

1.2 采样频率的设置

2010年1、3、5、7、9、11月每月中旬采样1次. 因为菜子湖处于中亚热带向北亚热带过渡地区,春、秋两

① 数据由安庆市林业局提供.

季气温变化较大,所以在这两个季节各设置两次采样.采样时用GPS定点,各断面间的距离在2.3~2.5 km之间,同一断面上采样点间的距离为1 km,枯水期时根据水位变化情况各采样点的位置略有调整.1月份为枯水期,水位下降,部分湖区水深在80 cm左右,乘小船采样.

1.3 样品的采集与实验室处理

按照《淡水浮游生物研究方法》^[17]的要求进行定性定量样品的采集与保存,带回实验室采用目镜视野法进行计数.定性样品用25[#]浮游生物网在选定点的湖水中0.5 m处以“∞”字形进行采集,时间为5~10 min,速度为20~30 cm/s,将样品保存到贴有标签的离心管中,加入1.5%的鲁哥试液固定,用10×40倍光学显微镜观察分类.定量样品采集用1 L有机玻璃采水器,视水体深浅而定,3 m以内只取表层(0.5 m)水样;3~10 m取表层0.5 m和底层0.5 m水样,混合后取1 L.将样品保存到贴有标签的1 L试剂瓶中,加入15 ml鲁哥试液固定,静置48 h以上,再浓缩至30 ml,放入离心管中.观察计数时先摇匀,然后取样品放入0.1 ml浮游植物计数框中,在10×40倍光学显微镜下观察100个视野.计数两片取平均值,若两片差别在15%以上,则计数3片,取相近两片的平均值.由于浮游植物的比重接近于1,故生物量可按细胞体积换算,先计算出细胞体积,以浮游植物的数量乘以各自体积换算成生物量^[18-19].

1.4 优势种的确定

浮游植物的优势种根据各个种的优势度(Y)值^[20-22]来确定:

$$Y = N_i / N \times f_i \quad (1)$$

式中, N_i 为*i*种的个体数, N 为所有种类总的个体数, f_i 为*i*种个体出现的频率. $Y > 0.02$ 的种类为优势种.

1.5 数据的分析与处理

1.5.1 生物多样性分析^[23-28] 生物多样性指数包括 Margalef 丰度指数(D)、Shannon-Weaver 多样性指数(H')和 Pielou 均匀度指数(J).其中, $D = (S - 1) / \log_2 N$, D 为0~1表示重污染, D 为1~2表示严重污染, D 为2~4表示中污染, D 为4~6表示轻污染, D 为>6表示清洁; $H' = - \sum (N_i / N) \log_2 (N_i / N)$, H' 为0~1表示重污染, H' 为1~2表示中污染, H' 为2~3表示轻污染, $H' > 3$ 表示清洁; $J = H' / \log_2 S$, J 为0~0.3表示重污染, J 为0.3~0.5表示中污染, $J > 0.5$ 表示轻污染或无污染,式中, N_i 为*i*种的个体数, N 为所有种类总的个体数, S 为物种数.

1.5.2 聚类分析和多重分析 采用统计分析软件 SPSS 13.0 对浮游植物群落进行聚类分析^[29],采用 LSD 多重比较法分析浮游植物种类组成、细胞密度以及生物量的季节差异性.

2 结果与分析

2.1 浮游植物群落组成特征

2.1.1 浮游植物的种类组成、细胞密度和生物量 于2010年1、3、5、7、9、11月在菜子湖10个断面进行采样,共检测到绿藻门、硅藻门、蓝藻门、裸藻门、黄藻门、金藻门、隐藻门、甲藻门8个门类,共计110属285种,

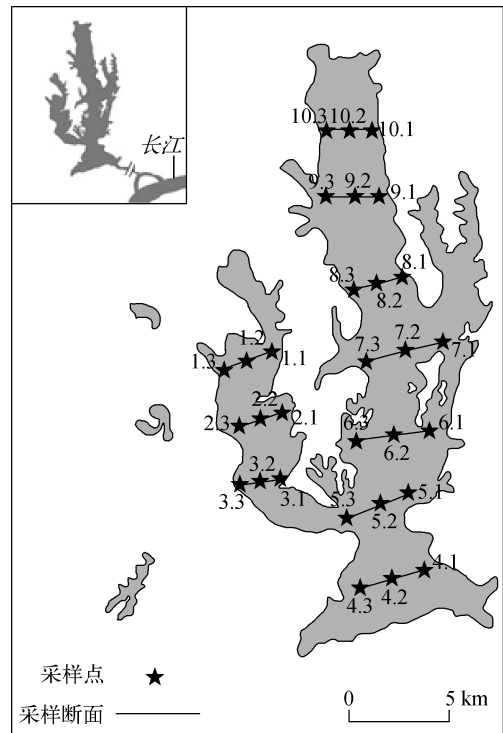


图1 菜子湖采样站位

Fig. 1 Sampling sites in Lake Caizi

其中绿藻门的种类最多,46 属 121 种;其次是硅藻门,19 属 69 种;再次是蓝藻门,28 属 39 种;裸藻门,8 属 30 种;黄藻门,3 属 8 种;金藻门,2 属 8 种;隐藻门,2 属 7 种;甲藻门,2 属 3 种. 不同月份浮游植物种类数差异极显著($F_{5,174} = 41.13, P < 0.01$),进一步 post hoc 多重比较分析显示:1、3、9 月之间以及与其他月份差异极显著($P < 0.01$);5、7、11 月之间差异不显著($P > 0.05$). 不同月份浮游植物细胞密度差异极显著($F_{5,174} = 14.87, P < 0.01$),进一步的 post hoc 多重比较分析显示:1、3、5、11 月与 7、9 月差异显著($P < 0.01$),1、3、5、11 月之间以及 7、9 月之间差异不显著($P > 0.05$). 不同月份浮游植物生物量亦存在极显著差异($F_{5,174} = 19.25, P < 0.01$),进一步的 post hoc 多重比较分析显示:9 月与其他月份差异极显著($P < 0.001$),其它月份之间差异不显著($P > 0.05$). 8 个门类在各月份均出现. 全年浮游植物细胞密度 7 月份最大,1 月份最小;生物量 9 月份最大,5 月份最小(表 1).

表 1 浮游植物物种数、细胞密度和生物量
Tab. 1 The number of species, cell density and biomass of phytoplankton

	1 月	3 月	5 月	7 月	9 月	11 月
物种数	105	173	143	130	132	114
细胞密度/($\times 10^5$ cells/L)	12.78 \pm 0.61	14.57 \pm 0.76	12.85 \pm 0.91	66.13 \pm 8.58	61.64 \pm 5.89	35.06 \pm 2.50
生物量/(mg/L)	0.78 \pm 0.03	0.77 \pm 0.04	0.72 \pm 0.03	0.90 \pm 0.05	2.80 \pm 0.17	1.50 \pm 0.09

2.1.2 浮游植物优势种 经计算,菜子湖 6 个月份浮游植物的优势种存在明显的季节变化规律:夏季均为蓝藻门种类,且优势度值高,其它季节优势种类较多,优势度值较低. 菜子湖浮游植物群落结构不同月份在组成上不一致(表 2). 结果显示蓝藻存在全年高峰,其优势种为近旋颤藻(*Oscillatoria subcontorta*)、小型念珠藻(*Nostoc minutum*)、多变鱼腥藻(*Anabaena variabilis*)、马氏平裂藻(*Merismopedia marssonii*)、细浮鞘丝藻(*Planktolyngbya subtilis*)、水华束丝藻(*Aphanizomenon flos-aquae*);硅藻存在 1、5、9、11 月的高峰,其优势种有颗粒直链藻(*Melosira granulata*)、尖针杆藻(*Synedra acus*)、肘状针杆藻(*Synedra ulna*)、颗粒直链藻极狭变种(*Melosira granulata* var. *angustissima*);黄藻存在于 1、3、5 月三个高峰,其优势种为小型黄丝藻(*Ribonema minus*)、近缘黄丝藻(*Tribonema affine*);金藻存在 1 月份 1 个高峰,其优势种为长锥形锥囊藻(*Dinobryon bavari-cum*);绿藻门存在于 11 月的高峰,其优势种为狭形纤维藻(*Ankistrodesmus angustus*);隐藻门存在 5 月的高峰,其优势种为嗜噬隐藻(*Cryptomonas erosa*).

表 2 菜子湖浮游植物优势种的优势度和细胞密度
Tab. 2 Dominance degree and cell density of dominant species of phytoplankton in Lake Caizi

优势种	优势度 Y						细胞密度/($\times 10^5$ cells/L)					
	1 月	3 月	5 月	7 月	9 月	11 月	1 月	3 月	5 月	7 月	9 月	11 月
颗粒直链藻	0.16			0.02	0.03		2.19 \pm 0.55				1.53 \pm 0.27	1.25 \pm 0.26
尖针杆藻	0.06		0.05	0.07	0.07		0.65 \pm 0.23		0.79 \pm 0.28		4.14 \pm 0.73	2.45 \pm 0.26
肘状针杆藻	0.04						0.41 \pm 0.09					
近缘黄丝藻	0.03						0.68 \pm 0.25					
长锥形锥囊藻	0.03						0.54 \pm 0.14					
小型念珠藻	0.03						1.46 \pm 0.69					
颗粒直链藻极狭变种	0.02			0.04	0.11		0.63 \pm 0.28				3.03 \pm 0.57	4.58 \pm 0.71
小型黄丝藻		0.07	0.05				3.94 \pm 0.85	0.95 \pm 0.26				
多变鱼腥藻		0.03	0.05			0.13	1.34 \pm 0.28	1.23 \pm 0.46				9.60 \pm 4.57
细浮鞘丝藻		0.03	0.03	0.68	0.13	0.07	1.21 \pm 0.27	1.90 \pm 0.88	52.15 \pm 9.38	10.31 \pm 6.25	4.54 \pm 1.59	
水华束丝藻				0.02					2.55 \pm 0.68			
近旋颤藻					0.53						32.69 \pm 5.89	
狭形纤维藻						0.04						1.69 \pm 0.09
马氏平裂藻			0.05						1.95 \pm 0.99			
嗜噬隐藻			0.03						0.38 \pm 0.11			

2.2 浮游植物多样性

Margalef 丰度指数 D 介于 1 ~ 2 之间, Shannon-Weaver 多样性指数 H' 除 7 月为 1.51 外, 其它月份的均值介于 2 ~ 3 之间, Pielou 均匀度指数 J 在 7 月和 9 月均值很低, 分别为 0.39 和 0.49, 其他月份介于 0.60 ~ 0.66 之间, 3 个指数值表现出一致的时间变化趋势, 1 月较高, 3 月达到最高水平, 5 月有所降低, 7 月降低到最低水平, 秋季又有所回升, 同时冬、春季节大于夏、秋季节 (图 2).

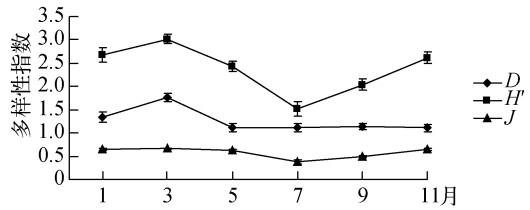


图 2 菜子湖浮游植物不同月份多样性指数
Fig. 2 Diversity indexes of phytoplankton of different months in Lake Caizi

2.3 浮游植物群落聚类分析

根据菜子湖各月份各采样断面浮游植物的种类和密度, 使用逐步成群法进行聚类分析, 指标间距离采用欧氏距离, 系统聚类方法使用完全连锁聚类^[29].

菜子湖 6 个月份浮游植物的聚类分析结果表明, 菜子湖各采样点浮游植物分类不同. 其中, 1、7、11 月分类较为明显 (图 3. 4), 3、5、9 月分类不明显.

菜子湖 7 月浮游植物可以明显的聚为两类 (图 3a). 类群 1 包括采样点 7.2、8.2、3.1、6.2、8.3、1.3、9.2、4.3、7.3、2.2、3.2、6.1; 除采样点 3.3 外, 其它 17 个采样点聚为类群 2. 类群 1 中平均浮游植物种类数为 32 种, 平均浮游植物细胞密度为 $(93.61 \pm 9.75) \times 10^5$ cells/L; 类群 2 中平均浮游植物种类数为 22 种, 平均浮游植物细胞密度为 $(35.45 \pm 5.32) \times 10^5$ cells/L; 类群 1 无论在物种数量还是细胞密度上均大于类群 2. 虽然 7 月蓝藻暴发, 但是在类群 1 中, 还能检测到小型黄丝藻、颗粒直链藻、尖针杆藻等种类, 并且占有一定的比例, 这些种类在类群 2 中占比例较小. 结合 2009 年植被图^[4] (2010 年与 2009 年植被变化不大), 在菜子湖东半部的类群 1 主要分布在湖心区的公共河道有植被的范围内. 类群 2 主要分布在湖中无植被的区域.

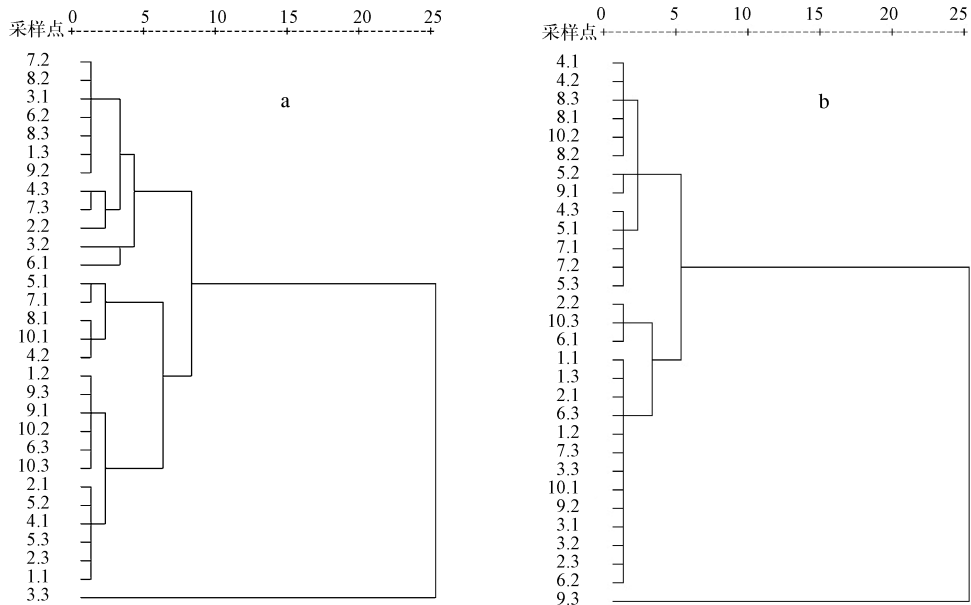


图 3 菜子湖 7 月份(a)和 11 月份(b)浮游植物聚类分析

Fig. 3 Cluster dendrogram of phytoplankton community in July (a) and November (b) in Lake Caizi

11 月份总体上聚为 2 类 (图 3b). 类群 1: 断面 1、2、3、6、采样点 7.3、9.2、10.1 和 10.3; 类群 2: 断面 4、5、7 (采样点 7.1、7.2)、8、采样点 9.1 和 10.2. 聚类结果表明浮游植物群落结构分布具有地域性特征. 类群 1 中平均浮游植物种类数为 34 种, 平均浮游植物细胞密度为 $(36.17 \pm 5.26) \times 10^5$ cells/L; 类群 2 中平均浮游植

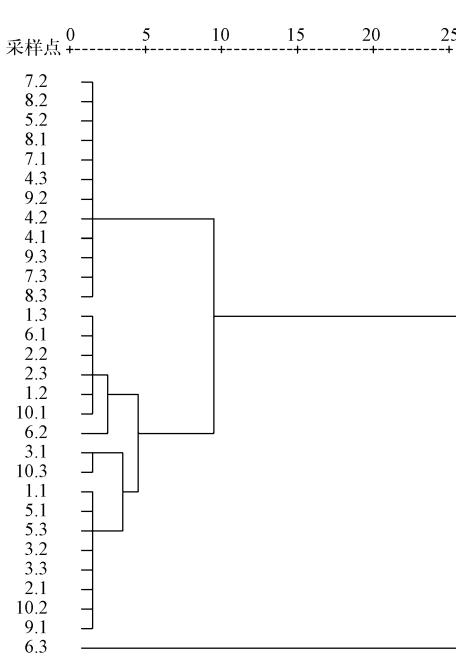


图4 菜子湖1月份浮游植物聚类分析
Fig.4 Cluster dendrogram of phytoplankton community in January in Lake Caizi

物种数为 22 种, 平均浮游植物细胞密度为 $(22.68 \pm 4.65) \times 10^5$ cells/L; 断面 9、10 的 6 个采样点浮游植物在种类和细胞密度上变化都比较大。

1 月份明显分为 2 类(图 4)。类群 1: 断面 1、2、3、5(采样点 5.1、5.3)、6(采样点 6.1、6.2)、10 和采样点 9.1, 类群 2: 断面 4、7、8、9(采样点 9.2、9.3) 和采样点 5.2。类群 1 中平均浮游植物种类数为 25 种, 平均浮游植物细胞密度为 $(15.51 \pm 1.81) \times 10^5$ cells/L; 类群 2 中平均浮游植物种类数为 10 种, 平均浮游植物细胞密度为 $(3.06 \pm 0.61) \times 10^5$ cells/L。

3 讨论

3.1 菜子湖浮游植物群落结构的季节动态

菜子湖浮游植物不同月份在组成上不一致, 是因为浮游植物不同门类对环境的适应能力有所不同, 不同季节水体的光照、温度、溶氧和理化条件均不同^[30-32]。1 月通江湖泊处于最低水位, 水温低、透明度大、有机质含量低, 金藻成为优势种之一。3 月大别山丰富的降水重新注入菜子湖, 气温也有所回升, 为浮游植物的生长提供了有利条件, 在这个时期浮游植物种类大量增加, 同时, 适应洁净水质的黄藻占绝对优势。7 月份, 温度上升, 蓝藻对高水温有较强的适应能力^[33], 另一方面由于周边农业生产, 大量含 N、P 化肥随

降水排入湖中, 就使得蓝藻大量繁殖, 在一定程度上抑制其他藻类的生长。所以夏秋季浮游植物种类数并不大于春季。

3.2 浮游植物最大密度与最大生物量出现的时间不一致

菜子湖浮游植物最大密度与最大生物量出现的时间不一致, 这主要是由于不同月份浮游植物细胞密度和生物量中占主导地位的种类组成存在差异。生物量的高低不仅与细胞数量有关, 还与细胞个体的质量有密切关系^[18]。7 月细胞体积较小的细浮鞘丝藻占优势; 9 月细胞体积相对较大的近旋颤藻、颗粒直链藻、颗粒直链藻极狭变种等占优势, 这些都导致 9 月生物量达到最大。5 月浮游植物的密度比 3 月有所下降并且生物量达到最小值, 有研究表明浮游动物的捕食会造成浮游植物生物量的下降^[34-35], 5 月浮游植物密度下降、生物量最小可能是由浮游动物的摄食造成的。

3.3 各多样性指数显示出一致的时间变化趋势

菜子湖浮游植物多样性指数值均在 3 月份达到最高值, 7 月达到最低值。3 月较高主要是因为温度回升和新鲜水源的注入, 浮游植物种类大量增加。7 月, 蓝藻大量繁殖使得均匀度大大降低, 而多样性指数是反映丰富度和均匀度的综合指标^[36], 均匀度较低可能是导致多样性指数低的主要原因。

3.4 菜子湖水水质评价

3.4.1 利用浮游植物生物量和细胞密度进行水质评价^[37-39] 菜子湖 9、11 月浮游植物生物量介于 1~3 mg/L 之间, 属于贫-中营养型, 其它月份均小于 1 mg/L, 属于贫营养型。有研究结果证明^[40], 在富营养化湖泊中细胞密度大且优势种单一, 常用细胞密度来评价水质。菜子湖优势种较多, 达到 15 种, 且优势度值大多数较低, 各月份细胞密度变化范围在 $(12.78 \pm 0.61) \times 10^5$ cells/L 与 $(66.13 \pm 8.58) \times 10^5$ cells/L 之间, 总体上菜子湖为贫中营养型。

3.4.2 藻类的种群结构是湖泊营养型评价的重要参数^[37,41] 有研究表明贫营养型水体主要由金藻、硅藻、黄藻组成, 富营养型水体以蓝藻和绿藻占绝对优势^[37]。菜子湖 1 月硅藻和金藻占优势; 3 月黄藻占优势; 5—11 月蓝藻占优势。由此判断菜子湖冬春季为贫营养型水体, 春末一直到秋末为富营养型水体。由于菜子湖是通

江湖泊,冬季时水流入江,春季又有新鲜水源,所以菜子湖不可能达到像巢湖那样严重的富营养化程度。

3.4.3 物种多样性指数常作为判断湖泊营养状况的检测指标^[37,42-45] 各月的 Margalef 丰度指数为 1~2 之间,各月份水质属于严重污染;7 月 Shannon-Weaver 多样性指数在 1~2 之间,水质属于中污染,其它月份 H' 值在 2~4 之间,水质属于轻污染;7 月和 9 月的 J 值为 0.3~0.5,水质属于中污染。3 个指数结果均反映出菜子湖夏季水质最差,春季水质最好,但对水体污染程度的评价结果不一致,还需要结合其他指标进行评价。

3.5 植被分布与浮游植物群落结构的相关性

聚类分析结果表明,7 月东部湖中采样点浮游植物聚为两大类。类群 1 主要集中在湖心区水生植被丰富的公共河道,其植被盖度高,水体透明度高,贫营养型的及固着性的浮游植物种类多,检测到小型黄丝、窗格平板藻、变异直链藻等种类并且占有一定的比例,较类群 2 的群落结构更为复杂。11 月采样时水生植被大多数种类已经枯萎,浮游植物群落结构具有地域性特征,其中类群 1 包括菜子湖西部湖区的断面 1、2、3 和处于菜子湖东部湖区中部的断面 6,这两个湖区相对较为封闭,和外界水体交流少,浮游植物在群落结构方面变化较慢,物种数和细胞密度都较高。断面 9、10 变化较大,可能是受外部河流的影响,具体原因还需要进一步深入研究。1 月,菜子湖断面 4、7、8、9 聚为一类,是因为这几个断面水位达到全年最低值,其浮游植物的种类和细胞密度都相对较小;断面 1、2、3、5、6、10 聚为另一类,是因为水位相对较高,其浮游植物的种类和细胞密度相对较高。1 月水位高低成为影响浮游植物群落结构的关键因素。而 3、5、9 月是水生植被开始生长(3、5 月)和开始衰退(9 月)的时期,这个时期受植被影响,各采样点的浮游植物群落结构变化也较大,因此在这 3 个月菜子湖水体浮游植物的聚类并不明显。菜子湖浮游植物聚类分析的结果表明植被对浮游植物的影响十分显著。

3.6 浮游植物对水生植被变化响应显著

研究结果表明,随着湖泊中植被盖度及其种类组成的变化,菜子湖浮游植物在群落结构特征上发生了相应变化。

2000 年,植被盖度达 80% 以上,优势群落以苦草和黑藻为主^[46];2007 年,植被盖度不足 50%^[4],优势群落以菱角、荇菜、马来眼子菜、狐尾藻、金鱼藻、黑藻为主;2009 年,湖区植被盖度小于 3%^[4],只有马来眼子菜零星分布于某些公共河道,水生植物的生物量大大下降;到 2010 年,植被盖度进一步减少,调查发现仅有少量菱角和马来眼子菜。

浮游植物属种数明显减少,细胞密度明显增加。2007 年,检测到浮游植物有 8 门 133 属 340 种;2010 年,检测到浮游植物有 8 门 110 属 285 种。种类数的减少主要体现在绿藻门、硅藻门、蓝藻门和裸藻门的种类。2000 年,浮游植物细胞密度仅为 2×10^5 cells/L^[47],2007 年,浮游植物细胞密度为 $(5.91 \pm 0.90) \times 10^5$ cells/L^[48],2010 年,浮游植物细胞密度增长为 $(33.81 \pm 10.10) \times 10^5$ cells/L,细胞密度的增加主要体现在蓝藻门密度的增加。

在群落结构方面,贫营养型指示种类减少,而富营养型指示种类增加;固着型浮游藻类减少,丝状藻类和浮游型藻类增多。金藻门种类对环境变化敏感,喜低温、低有机质含量、透明度大的水体。2007 年,金藻门种类较多,出现率较高,并且长锥形锥囊藻、圆筒形锥囊藻(*Dinobryon cylindricum*)可在冬季成为优势种(数据未发表),到 2010 年时,只有长锥形锥囊藻在冬季成为优势种,圆筒形锥囊藻出现率降为 3.7%;2007 年中出现的黄群藻(*Synura uella*)、肾形双角藻(*Bitrichia phaseolus*)在 2010 年都未检测到。绿藻门的鼓藻是贫营养型的代表^[11]。鼓藻的种类变化也很大,2007 年中凹顶鼓藻属(*Euastrum*)、顶接鼓藻属(*Spondylosium*)、叉星鼓藻属(*Staurodesmus*)等属的种类在 2010 年中均未检测到,而它们被认为是贫营养型水体的典型种类。2007 年为优势种的裂开圆丝鼓藻(*Hyalotheca dissiliens*)、纤细角星鼓藻(*Staurastrum gracile*)在 2010 年都未成为优势种,优势种演变成狭形纤维藻。蓝藻门中的优势种变化明显,在 2007 年有 4 种为优势种,到 2010 年达到 6 种,且都为富营养化种类,水华束丝藻、细浮鞘丝藻、小型念珠藻、近旋颤藻、马氏平裂藻等在 2007 年出现率较低的种类在 2010 年成为优势种。硅藻门的变异直链藻(*Melosira varians*)、窗格平板藻(*Tabellaria fenestrata*)、钝脆杆藻(*Fragilaria capucina*)等附着藻在 2007 年成为优势类群(数据未发表),而 2010 年出现率大大降低。

菜子湖的这种转变主要是由于水产养殖不合理:菜子湖从 1980s 湖泊主要转向人工养殖,但植被还未受到大面积破坏,2007 年仍然有 50% 左右,浮游植物仍然表现为较高的多样性.近几年来主要是围网养殖螃蟹,造成大型水生植物减少、植被盖度急剧下降,使得浮游植物不但减少了竞争者而且还有充足的营养物质来进行自身的繁殖^[49],也使得着生性和草丛性的浮游藻类丧失沉水植物的固着基质,其群落结构发生明显变化.2007—2009 年,影响浮游植物群落结构的主要因素是植被的显著退化,因此,认为植被变化是影响浮游植物群落结构变化的关键因素.此外,7 月的聚类分析结果也证明植被对浮游植物的影响是显著的.

4 参考文献

- [1] 杨 珊,胡利梅,高 瑞等.洞庭湖区湿地生态系统存在的问题及其对策研究.环境资源与发展,2006,4:30-33.
- [2] 梁秩燊,周春生,黄鹤年等.长江中游通江湖泊——五湖的鱼类组成及其季节变化.海洋与湖沼,1981,12(5):468-478.
- [3] 何山春,朱文中,吴小龙.安徽湿地资源与湿地分类资源的研究.安徽大学学报,2002,26(2):103-106.
- [4] 高 攀,周忠泽,马淑勇.浅水湖泊植被分布格局及草-藻型生态系统转化过程中植物群落演替特征:安徽菜子湖案例.湖泊科学,2011,23(1):13-20.
- [5] 秦伯强,宋玉芝,高 光.附着生物在浅水富营养化湖泊-草型生态系统转化过程中的作用.中国科学:C 辑,2006,36(3):283-288.
- [6] 彭自然,陈立婧,王 武.长江中下游浅水湖泊水产养殖污染现状与对策.安徽农业科学,2010,38(12):6467-6468.
- [7] Sayer CD, Davidson TA, Jones JI. Seasonal dynamics of macrophytes and phytoplankton in shallow lakes: a eutrophication-driven pathway from plants to plankton? *Freshwater Biology*, 2010, 55: 500-513.
- [8] Mason CF, Bryant RJ. Changes in the ecology of the Norfolk Broads. *Freshwater Biology*, 1975, 5: 257-270.
- [9] Jeppesen E, Jensen JP, Søndergaard M *et al.* Trophic structure, species richness and biodiversity in Danish lakes: changes along a phosphorus gradient. *Freshwater Biology*, 2000, 45: 201-218.
- [10] Hilton J, O'Hare M, Bowes MJ *et al.* How green is my river? A new paradigm of eutrophication in rivers. *Science of the Total Environment*, 2006, 365(1/2/3): 66-83.
- [11] 饶钦止,章宗涉.武汉东湖浮游植物的演变(1956—1975 年)和富营养化问题.水生生物学集刊,1980,7(1):1-17.
- [12] Asaeda T, Trung VK, Manatunge J *et al.* Modelling macrophyte-nutrient-phytoplankton interactions in shallow eutrophic lakes and the evaluation of environmental impacts. *Ecological Engineering*, 2001, 16(3): 341-357.
- [13] Mulderij G, Van Nes EH, Van Donk E. Macrophyte-phytoplankton interactions: The relative importance of allelopathy versus other factors. *Ecological Modelling*, 2007, 204(1/2): 85-92.
- [14] 章宗涉.水生高等植物—浮游植物关系和湖泊营养状态.湖泊科学,1998,10(4):83-86.
- [15] Kömer S, Nicklisch A. Allelopathic growth inhibition of selected phytoplankton species by submerged macrophytes. *Journal of Phycology*, 2002, 38: 862-871.
- [16] Mulderij G, Mooij WM, Van Donk E. Allelopathic growth inhibition and colony formation of the green alga *Scenedesmus obliquus* by the aquatic macrophytes *Stratiotes aloides*. *Aquatic Ecology*, 2005, 39: 11-21.
- [17] 章宗涉,黄祥飞.淡水生物研究方法.北京:中国科学出版社,1991:333-344.
- [18] 陈家长,孟顺龙,尤 洋等.太湖五里湖浮游植物群落结构特征分析.生态环境学报,2009,18(4):1358-1367.
- [19] 庞 科,姚锦仙,王 昊等.额尔古纳河流域秋季浮游植物群落结构特征.生态学报,2011,31(12):3391-3398.
- [20] Chen QC, Huang LM, Yin JQ. Biodiversity of the zooplankton in the waters around Nansha Islands. In: *Marines biodiversity of the Nansha islands and its neighboring waters*. Beijing: China Ocean Press, 1994:42-50.
- [21] 张 婷,李 林,宋立荣等.熊河水库浮游植物群落结构的周年变化.生态学报,2009,29(6):2971-2979.
- [22] Spatharis S, Roelke DL, Dimitrakopoulos PG. Analyzing the (mis) behavior of Shannon index in eutrophication studies using field and simulated phytoplankton assemblages. *Ecological Indicators*, 2011, 11: 697-703.
- [23] Shannon CE, Weaver W. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27: 379-423, 623-656.
- [24] Margalef R. Information theory in ecology. *General Systems*, 1958, 3: 36-71.
- [25] 白 明,张 萍.海河干流浮游植物群落多样性研究.现代渔业信息,2010,25(11):6-10.

- [26] Pielou EC. The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of the Oretical Biology*, 1966, **13**: 131-144.
- [27] Belaousoff S, Kevan PG, Murphy S *et al.* Assessing tillage disturbance on assemblages of ground beetles(Coleoptera: Carabidae) by using a range of ecological indices. *Biodiversity and Conservation*, 2003, **12**(5): 851-882.
- [28] Danilov R, Ekelund NGA. The efficiency of seven diversity and one similarity indices based on phytoplankton data for assessing the level of eutrophication in lakes in central Sweden. *Science of the Total Environment*, 1999, **234**: 15-23.
- [29] 秦铭俐,魏永杰,王晓波等. 杭州湾枯水期浮游植物群落结构的研究. *海洋环境科学*, 2008, **27**(增1): 57-60.
- [30] Alam MGM, Jahan N, Thalib L *et al.* Effects of environmental of factors on the seasonally change of phytoplankton populations in a closed freshwater pond. *Environment International*, 2001, **27**(5): 363-371.
- [31] Brogueira MJ, Oliveira MR, Cabecadas G. Phytoplankton community structure defined by key environment variables in Tagus estuary, Portugal. *Marine Environmental Research*, 2007, **64**: 616-628.
- [32] Carter CM, Ross AH, Schiel DR *et al.* *In situ* microcosm experiment on phytoplankton community composition. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2005, **326**: 1-13.
- [33] Hunt RJ, Matveev V, Jones GJ *et al.* Structuring of the cyanobacterial community by pelagic fish in subtropical reservoirs: experimental evidence from Australia. *Freshwater Biology*, 2003, **48**: 1482-1492.
- [34] Sommer U, Gliwicz MZ, Lapmert W *et al.* The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in freshwaters. *Archives of Hydrobiology*, 1986, **106**: 433-471.
- [35] Arhonditsis GB, Winder M, Brett MT *et al.* Patterns and mechanisms of phytoplankton variability in Lake Washington (USA). *Water Research*, 2004, **38**: 4013-4027.
- [36] 孙儒泳,李 博,诸葛阳等. 普通生态学. 北京:高等教育出版社,1993:135-138.
- [37] 况琪军,马沛明,胡征宇等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展. *安全与环境学报*, 2005, **5**(2): 87-91.
- [38] 邱小琮,赵红雪. 宁夏沙湖浮游植物群落结构及多样性研究. *水生态学杂志*, 2011, **32**(1): 20-26.
- [39] 姚维志,史建全,祁洪芳等. 2006—2010年夏季青海湖浮游植物研究. *淡水渔业*, 2011, **41**(3): 22-28.
- [40] 李 原,张 梅,王若南. 滇池的水华蓝藻的时空变化. *云南大学学报:自然科学版*, 2005, **27**(3): 272-276.
- [41] Lepistö L, Holopainen AL, Vuoristo H. Type-specific and indicator taxa of phytoplankton as a quality criterion for assessing the ecological status of finnish boreal lakes. *Limnological*, 2004, **34**: 236-248.
- [42] 许金花,潘伟斌,张海燕. 城市小型浅水人工湖泊浮游藻类与水质特征研究. *生态科学*, 2007, **26**(1): 36-40, 49.
- [43] 郑丙辉,田自强,张 雷等. 太湖西岸湖滨带水生生物分布特征及水质营养状况. *生态学报*, 2007, **27**(10): 4214-4223.
- [44] Danilov R, Ekelund NGA. The efficiency of seven diversity and one similarity indices based on phytoplankton data for assessing the level of eutrophication in lakes in central Sweden. *Science of the Total Environment*, 1999, **234**: 15-23.
- [45] 许木启. 从浮游动物群落结构与功能的变化看府河—白洋淀水体的自净效果. *水生生物学报*, 1996, **20**(3): 212-220.
- [46] 何家庆. 安徽枞阳湿地植被及植物资源的研究. *武汉植物学研究*, 2000, **18**(4): 291-301.
- [47] 施葵初. 安徽湿地. 合肥:合肥工业大学出版社, 2003:132-160.
- [48] 赵秀侠. 安徽菜子湖浮游植物生物多样性研究[学位论文]. 合肥:安徽大学, 2008:43-46.
- [49] 王朝晖,林秋奇,胡 韧等. 广东省水库的蓝藻污染状况与水质评价. *热带亚热带植物学报*, 2004, **12**(2): 117-123.